

Sonagraphische Untersuchungen von Vokalen in Abhängigkeit von der Tonhöhe

von

Karl Weidl

aus

Aidenbach/Niederbayern

1972

Aus der Hals-Nasen-Ohren-Klinik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Professor Dr. med. G. Theissing

Sonographische Untersuchungen von Vokalen in Abhängigkeit von der Tonhöhe

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt

von

Karl Weidl

aus

Aidenbach/Niederbayern

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der
Universität Erlangen - Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. H. Pauly
Referent: Prof. Dr. G. Kittel
Coreferent: Prof. Dr. G. Theissing
Tag der mündlichen Prüfung: 10.10.1972

Meinem sehr verehrten Lehrer,

Herrn Prof. Dr. G. Kittel,
danke ich herzlich für die freundliche Überlassung
des Themas, sowie für die jederzeit gewährte Unter-
stützung.

Herrn Prof. Dr. G. Theissing danke ich für die groß-
zügige Überlassung von Institutseinrichtungen.

Mein Dank gilt aber auch Herrn Dipl. Ing. M. Moser
und all den Probanden, die sich meiner Arbeit zur
Verfügung gestellt haben.

MEINEN ELTERN
IN DANKBARKEIT GEWIDMET



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546313_0047

Inhaltsverzeichnis

=====

A. Einleitung	1
B. Literatur	2
I. Die menschliche Stimme.....	2
1. Geschichtliche Vorbemerkungen.....	2
2. Theorien der Stimmerzeugung	3
a) Die klassische musculo- elastische Theorie	3
b) Die neuro - chronaxische Theorie	4
3. Das Schwingungssystem der menschlichen Stimme	4
a) Anatomische und physikalische Voraussetzungen	4
b) Die Beschreibung der Schwingungen	6
4. Das Regelverhalten bei der Stimmgebung.....	8
a) Die Regelung des Betriebsdruckes.....	9
b) Der mechanisch - pneumatische Regelkreis	9
c) Das Problem Steuerung -Regelung bei der Lautproduktion	9
d) Der cochleo - recurrentielle Regelkreis	10
II. Neuere Methoden der Stimmregistrierung	10
1. Das Suchtonverfahren	10
2. Das Tonfrequenzspektrometer	10
3. Das Visible - Speech - Verfahren	11
C. Material und Methodik	11
I. Material.....	11
1. Liste des Materials	11
2. Beschreibung des verwendeten Materials	12
3. Schwierigkeiten bei der Gewinnung der Sonagramme	13

4. Verwendete Apparaturen	13
a) Der Lautpegelmesser	13
b) Der Sonagraph	13
II. Methodik	14
1. Versuchsanordnung und Durchführung	14
2. Aufnahmetechniken	16
a) Einhaltung der Sprechentfernung	16
b) Die Aufnahmedauer	16
c) Messung der Lautstärke	17
d) Ausschaltung des Raumeinflusses	17
e) Einhaltung der Tonhöhe	17
D. Eigene Untersuchungen mit Ergebnissen	18
1. Ergebnis 1	18
2. Ergebnis 2	20
3. Ergebnis 3	20
4. Ergebnis 4	21
5. Ergebnis 5	21
6. Ergebnis 6	21
7. Ergebnis 7	22
E. Diskussion	23
1. Besprechung und Gegenüberstellung der eigenen Ergebnisse mit der Literatur ...	23
a) des Ergebnisses aus D.1.	23
b) des Ergebnisses aus D.2.	23
c) des Ergebnisses aus D.3. und D. 4.	25
d) des Ergebnisses aus D.5.	25
e) des Ergebnisses aus D.6.	26
f) des Ergebnisses aus D.7.	26
2. Kritik der eigenen Methode	26
a) Fehlerquelle bei der Aufnahme selbst ...	26
b) Fehlerquelle bei der Ausmessung	26
3. Aussichten für weitere Untersuchungen	27
F. Zusammenfassung	28
G. Literaturverzeichnis	30
H. Anhang	32

A. Einleitung

Die wissenschaftlichen Untersuchungsmethoden der Phoniatrie vor dem 2. Weltkrieg war das Sorgenkind der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Die damals üblichen mechanisch - pneumatischen Meßgeräte lieferten zwar experimentelle Ergebnisse, jedoch erschien ihre Zuverlässigkeit fragwürdig und deren Anzeigewerte waren kaum zu kontrollieren. Das galt besonders für die Resonanzstellen der Apparaturen. Mit dem Einsatz modernster Geräte reduzierten sich die Fehlerquellen auf ein Minimum, und die Phoniatrie nahm immer mehr an Bedeutung zu, insbesondere mit der Entwicklung des Sonagraphen.

Jetzt soll geklärt werden, wie sich eine Tonhöhenänderung auf die menschliche Stimme auswirkt. Untersucht wird das Frequenzspektrum der Stimme im Bereich bis 5000 Hz. Die Messungen beziehen sich auf die gesungenen Vokale A, E, I, O, U, in der Tonhöhe $d = 146,84$ Hz, $a = 220$ Hz, $d^1 = 293,67$ Hz. Die Klanganalyse erfolgt mit Hilfe eines Sonagraphen, der von R. K. POTTER, und seinen Mitarbeitern 1947 entwickelt wurde.

B. Literatur

=====

I. Die menschliche Stimme

1. Geschichtliche Vorbemerkungen (11)

Die ersten Untersuchungen über die Stimmerzeugung gehen auf ARISTOTELES und GALEN zurück. Gemäß der damaligen Zeit stammen jene Anschauungen nicht aus der lebenden Welt, wie heute, sondern aus der Literatur. So identifiziert GALEN die Stimmbildung mit der Tätigkeit der Stimmritze und der entsprechenden Knorpeln. Den Kehlkopf und die in ihm liegenden Stimmbänder vergleicht er mit der Zunge einer Flöte.

Die folgende Zeit bringt wenig Neues. Erst im 18. Jahrhundert wagen sich die Forscher zunächst an die tote Materie und berücksichtigen erstmals die Tätigkeit des Kehlkopfes, obwohl sie darüber keine genauen Vorstellungen haben.

Zu jenen Forschern gehörte ANTOINE FERREIN, der als der eigentliche experimentelle Stimmphysiologe bezeichnet werden kann. Er betrachtet den Kehlkopf als ein Saiteninstrument, dessen Tonhöhe von der Spannung der Stimmlippe abhängig ist.

Hervorzuheben ist auch die Arbeit von J. MÜLLER der seine Untersuchungen am präparierten Kehlkopf durchführt.

Die größten Fortschritte aber gewinnt MANUEL GARCIA. Er wird als der Columbus der Stimme bezeichnet, denn er beschreibt als erster die Tonbildung am lebenden Menschen. Ein Zahnarztspiegel erlaubt ihm das Kehlkopffinnere in Tätigkeit zu beobachten.

LUDWIG TÜRK verwendet zur Kehlkopfbetrachtung ebenfalls einen Spiegel, den JOH.N. CERMAK, Professor für Physiologie in Prag, modifizierte. Von ihm stammt der seither gebräuchliche Name Laryngoskopie.

Durch diese Entdeckung angespornt, erfährt die weitere Forschung einen enormen Auftrieb, und es entstehen erstmals wissenschaftlich fundierte Theorien der Stimmerzeugung.

2. Theorien der Stimmerzeugung (11)

a) Die klassische musculo - elastische Theorie

Die klassische Theorie erklärt die Stimmerzeugung damit, daß die Stimmlippen ein selbst gesteuertes Vibrations-system bilden. Die Bewegung der Stimmlippen folgt dabei dem BERNOULLI'schem Gesetz, d.h. sie werden nicht nur von einem bestimmten Druck auseinandergetrieben, sondern in gleicher Weise wieder zusammengeführt. Das ZNS stellt dabei die elastischen Stimmlippen ein.

LINDEMANN sieht den n. laryngeus cranialis als die wahrscheinliche afferente Bahn eines propriozeptiven Reflexes an, dessen efferente Bahn der n. laryngeus caudalis ist. R.HUSSON hat diesen Mechanismus mit einem eindrucksvollen Selbstversuch im Jahre 1950 bestätigt. Die Bildung der Kopfstimme war nicht mehr möglich und das sogenannte vorwiegend gedeckte Singen gelang ihm nur mühsam.

K. PAULSEN dagegen spricht den Muskelspindeln höchstens eine Kontrolle des Spannungszustandes zu. Da aber nur wenig Spindeln in den Kehlkopfmuskeln vorkommen, glaubt er schließen zu können, daß die Phonation besser und exakter ohne Rezeptoren ablaufen kann. Die Rezeptoren der Kehlkopfschleimhaut, die jedoch zahlreicher zu finden sind, können über einen polysynaptischen Reflexbogen kontrollierend und regelnd die Vorgänge im Larynxbereich beeinflussen.

b) Die neuro - chronaxische Theorie

Die neuro - chronaxische Theorie steht heute der herrschenden musculo - elastischen Erklärung gegenüber, die von R. HUSSON (8) aufgestellt wurde. Seine Theorie hebt die Bedeutung der Kehlkopfinnervation stark hervor.

R. HUSSON behauptet, daß die Schwingungen "Coup pour coup" vom n. recurrens selbst gesteuert sind; d.h., daß es sich um erzwungene Schwingungen handelt.

Zahlreiche Autoren wie H. van BERG (1), M. HAST, V. NEGUS, B. VALLENTIEN, D. WEISS (19), F. WUSTROW u.a. lehnen diese Theorie ab. Die Zeitdehnerfilme von K. MÜNDNICH (1958) und L. RUEDIE (1959) zeigen auch, daß die Stimmlippen-schwingungen mit dem Luftstrom aufhören.

Zusammenfassend aber kann man sagen, daß der Kehlkopf als ein selbstgesteuertes Vibrationssystem mit einem Dämpfungsfaktor angesehen werden muß und durch den Druck unterhalb der Stimmritze in erzwungener Schwingung gehalten wird. Analog der Öffnungs- und Schließbewegung der Stimmlippen unterliegt die Luft unterhalb der Stimmritze Druckschwankungen zu Beginn und am Ende jeder Schwingung. Das Nervensystem (Rekurrensfunktion) steuert die Veränderung der Stimmlippenstellung durch eine wechselnde Spannung des Stimmlippenmuskels.

3. Das Schwingungssystem der menschlichen Stimme

a) Anatomische und physikalische Voraussetzungen

Das menschliche Stimmorgan, das befähigt ist, eine Vielzahl von akustischen Erscheinungen darzubieten und in kürzester Zeit zu ändern, nimmt seine Energie aus der in der Lunge komprimierten Luft. Die Stimmlippen werden beim ausströmen derselben, wie bereits erwähnt, zum Schwingen gebracht.

Der Vorgang spielt sich in folgender Weise ab:

Die anfangs geschlossenen Stimmlippen werden durch eine Druckerhöhung unterhalb der zu denkenden Stimmritze auseinander gepresst. Durch die elastische Rückstellkraft der Muskulatur und dem BERNOULLI'schem Effekt werden die Stimmlippen, die währenddessen hochfrequente Eigenschwingungen ausführen, durch Druckminderung einander genähert. Die Stimmritze ist nur während eines kleinen Teiles der Periode geöffnet. Den größten Teil der Periode verformen sich die Stimmlippen bei geschlossenem Zustand in sich. Das Spiel kann von Neuem beginnen. Die dabei auftretenden Frequenzen bei gesprochenen Lauten liegen je nach der Tonuslage der Muskulatur bei Männern zwischen etwa 120 - - 160 Hz, bei Frauen und Kindern etwa zwischen 220 - 330 Hz.(17)

Über dem Kehlkopf liegt das Ansatzrohr mit seinen Höhlen (Rachen-Mund- und Nasenhöhle), das bei stimmhaften Vokalen nach außen tritt. Die Abstrahlung erfolgt bei hohen Frequenzen stark gerichtet (18). Je nach Frequenzlage und Dämpfung der Eigenschwingungen des Ansatzrohres werden bestimmte Obertonbereiche des von den Stimmlippen herrührenden Klanges verstärkt. Lage und Dämpfung der Eigenschwingungen hängen insbesondere von der Mund- und Zungenstellung ab. Jeder Vokal ist bestimmt durch eine festgelegte Stellung und damit ein besonders auftretender Resonanzbereich, der Formantenbereich (5) (Abb.1).

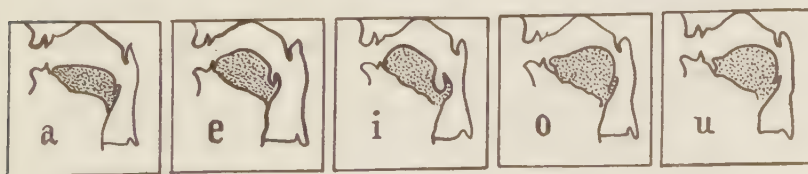


Abb. 1 Die Mundstellung bei den fünf Hauptvokalen
(nach H. FLETCHER)

b) Die Beschreibung der Schwingungen

Die menschliche Stimme setzt sich aus einer Vielzahl akustischer Schwingungen komplizierter Art zusammen. Der französische Mathematiker J. B. FOURIER (1800) stellte fest, daß man sich jede komplizierte, sich wiederholende Schwingung - wie es die menschliche Stimme ist - als eine Addition von Sinusschwingungen verschiedener Frequenz und Amplitude vorstellen muß. Beim Durchgang durch das Ansatzrohr erfährt dieses Spektrum eine Amplitudenmodulation. (Abb. 2)

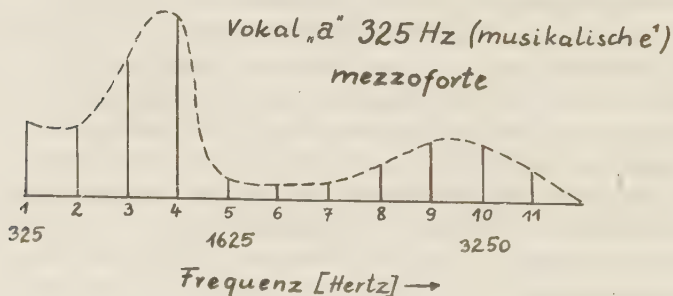


Abb. 2 Linienpektrum einer Sopranstimme.
Vokal (a) gesungen auf e¹ = 325 Hz, 11 Teil-
töne. (nach F. WINCKEL)

F. TRAUTWEIN (16) erkannte als erster, daß die Druck-
änderungen impulsartig erfolgen. Diese durch die Glottis
entstandenen Impulse veranlassen die Räume des Ansatz-
rohres im Bereich der artikulatorisch eingestellten For-
manten zu Resonanzschwingungen (Stoßformantentheorie).
Wichtig ist, daß die auftretenden Resonanzen stark ge-
dämpft sind (15). M. JOOS (9) fand dabei heraus, daß die
Impulsdauer unabhängig von der Tonhöhe konstant 1/5 Milli-
sekunden beträgt.

CREMER (3) beschreibt die Vorgänge folgendermaßen:
Singen wir z.B. einen Vokal, so können wir sowohl die Tonhöhe, als auch den Vokal selbst ändern. Das erstere steuern wir mit dem Kehlkopf, der mit Hilfe seiner verschließbaren Bänder einen periodischen Luftstrom freigibt und letzteres durch Veränderungen des Mundraumes. Diese Veränderungen kann man dadurch beschreiben, daß wir die Mundhöhle als einen Hohlraum mit überall gleichem Schalldruck und die von den Lippen gebildete Mundöffnung als ein kurzes Rohrstück betrachten. Abbildung 3 zeigt das wesentliche Prinzip, das der Ausgangspunkt der Lehre von der Sprachzeugung war.

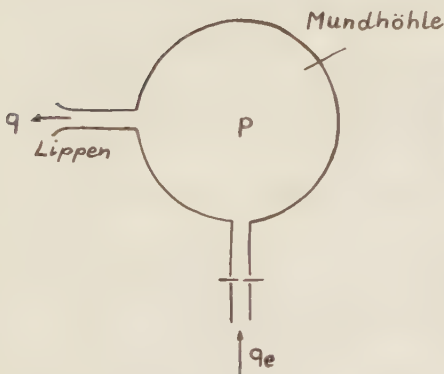


Abb. 3 Schema zur Vokalerzeugung (nach L.CREMER)

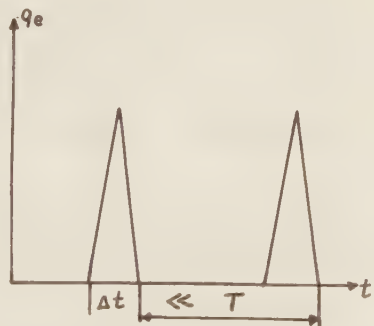


Abb. 4 Zeitverlauf des erregenden Schallflusses (nach L.CREMER)

Dabei bedeutet:

q_e = erregender Schallfluß

q = abgestrahlter Schallfluß

p = Druck

t = Stoßzeit

T = Periodendauer

Der Zeitverlauf des erregenden Schallflusses wird von den Stimmbändern gesteuert und hat etwa den Verlauf kurzer, dreiecksförmiger Stöße. (Abb. 4)

In dem Zeitraum zwischen den einzelnen Stößen ergibt sich eine zeitliche Volumen- und Druckänderung, die sich den Stoßerregungen entsprechend periodisch wiederholen. Die dabei erfolgten Stoßantworten bezeichnet CREMER treffend als Vokalpuls. (Abb. 5)

Gleichzeitig beobachtet man eine Dämpfung der Stimmlippen-schwingungen.

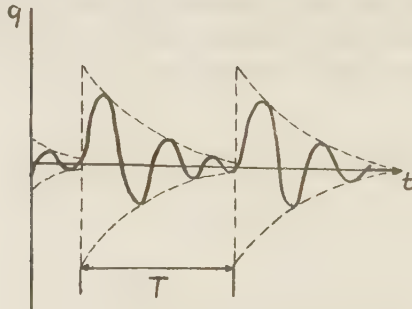


Abb. 5 Zeitverlauf des Vokalpulses(nach L.CREMER)

4. Das Regelverhalten bei der Stimmgebung

Spektralanalysen haben gezeigt, daß z.B. die Parameter Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe trotz größter Anstrengungen nicht konstant gehalten werden können. Die Ursache dafür liegt im Wesen der organischen Gebilde, nämlich in der selbsttätigen Regelung.

In den nun folgenden Abschnitten wird kurz das verschiedene Regelverhalten bei der Stimmgebung charakterisiert.

a) Die Regelung des Betriebsdruckes

Die Glottis wirkt, sei es beim ruhigen Sprechen oder beim Schreien, wie ein Ventilwiderstand, der von der externen und internen Interkostalmuskulatur, den Muskeln m. obliquus externus, m. rectus abdominis, m. latissimus dorsi geregelt wird. Dies stellte LADEFOGED (4) fest. In seinen Versuchen ermittelte er eine durchschnittliche Druckerhöhung von 2 - 9 cm Wassersäule. Seine Spitzenwerte reichten nur bis 30 cm.

b) Der mechanisch - pneumatische Regelkreis

Dieser Regelkreis kontrolliert die Umwandlung von Gleichluft in Wechselluft mit Hilfe von Empfängern, deren Existenz in histologischen Präparaten nachweisbar ist. Sie reagieren gemäß den Druckänderungen nach der Zeit ($\frac{dp}{dt}$).

RUDOLPH beschreibt auch, wie mit Hilfe proprioceptiver Reize in der Larynxmuskulatur der Istwert über das nervöse Geschehen wiederhergestellt wird. (14)

c) Das Problem Steuerung - Regelung bei der Lautproduktion

Bekanntlich unterliegen unbewußte Vorgänge einer Regelung, wohingegen bewußte Vorgänge eher von einer Steuerungsfunktion ausgehen. Betrachtet man das Sprechen in Bezug auf die normale Phonation, so kann man sagen, daß das weitgehend unbewußt geschieht und somit mehr ein Regelungsproblem darstellt. Dagegen ist Singen ein mehr oder weniger bewußtes phoniatrisches Gestalten und daher ein zusammengesetzter Prozess von Steuerung und Regelung. Eine absolute Grenze zwischen bewußten und unbewußten Abläufen wird man nie genau ziehen können. Es ist vielmehr beides kombiniert und deshalb überwiegt in einem Fall die Regelung, im anderen die Steuerung.

d) Der cochleo - recurrentielle Regelkreis

Dieser Regelkreis bedeutet die auditive Kontrolle des gesprochenen Wortes bzw. des Gesanges. Jedoch kann man auch hier den Einfluß der Steuerung nicht leugnen, denn am Beginn des Sprechens bzw. des Gesanges liegt eher ein bewußter Einfluß vor.

II. Neuere Methoden der Stimmregistrierung

Die moderne Elektroakustik hat einen wesentlichen Beitrag zur Stimmregistrierung geleistet. (7) Die gegenwärtig gebräuchlichen Methoden sind das Suchtonverfahren, der Einsatz des Tonfrequenzspektrometers und das Visible - Speech - Verfahren.

1. Das Suchtonverfahren

Beim Suchtonverfahren wird elektroakustisch ein sogenannter Suchton erzeugt, der den zu analysierenden Klang im Frequenzbereich von 0 - 16000 Hz beliebig abtastet. Fällt der erzeugte Suchton in den Bereich des harmonischen Tones, so zeigt ein Galvanometer einen Ausschlag, dessen Größe das Maß für die Intensität des betreffenden Partialtones angibt.

2. Das Tonfrequenzspektrometer

Mit Hilfe dieses Gerätes kann man gleichzeitig mit dem Originalklang auf dem fluoreszierenden Schirm einer Braun'schen Röhre ein optisches Bild seiner Analyse erzeugen. Die Partialtonfrequenzen sind auf der Abszisse, die Amplitudengröße auf der Ordinate eines Koordinatensystems dargestellt. Die Analyse erfolgt in einer Frequenzbreite, je nach Gerät von einer Viertel- bzw. Drittel-Oktave. Für die feineren Abstufungen

sind die Filter noch recht grob und die Auswertung einer gefilmten, fortlaufenden Klanganalyse ist umständlich und nicht ganz zweifelsfrei.

3. Das Visible - Speech - Verfahren

Die zur Zeit wohl vollkommenste Analysiermethode der Stimme ist das von R. K. POTTER und Mitarbeitern entwickelte Visible - Speech - Verfahren. (13)

Sein besonderer Vorzug liegt in der Einbeziehung der Zeit als dritte Dimension in das optische Bild der Analyse. Die genaue Beschreibung finden Sie in Kapitel C/I./4./b

C. Material und Methodik

=====

I. Material

1. Liste des Materials

Das gewonnene Material besteht aus Sonagrammen, die von 20 Probanden aufgenommen wurden. Von jedem dieser Probanden wurden 15 Aufnahmen in drei verschiedenen Tonhöhen gemacht. Die Aufnahmen gliedern sich in folgende drei Versuchsreihen:

a) Erste Versuchsreihe

Vokale: A, E, I, O, U; Tonhöhe d = 146,84 Hz

b) Zweite Versuchsreihe

Vokale: A, E, I, O, U; Tonhöhe a = 220 Hz

c) Dritte Versuchsreihe

Vokale: A, E, I, O, U; Tonhöhe d¹ = 293,67 Hz

2. Beschreibung des verwendeten Materials

Die Sonagramme bestehen aus einem geschwärzten Papier, das mit einer dünnen, weißen Wachsschicht überzogen ist. Die darauf eingebrannten Strukturen werden je nach Spektralintensität in verschiedenen Tonstufen wiedergegeben. Die abgebildeten Frequenzen erscheinen als harmonische Töne, die sich in einem fast geradlinigen Verlauf quer über das Sonagramm ziehen. Das Sonagramm zeigt eine dreidimensionale Darstellung. In der vertikalen Achse ist die Frequenz, in der horizontalen Achse die Zeit aufgetragen und als Maß der Schwärzung erscheint die Amplitude. Um die Genauigkeit der Auswertung zu erhöhen, ist der analysierte Frequenzbereich gedehnt dargestellt. Die oberste Frequenzgrenze liegt zwischen 5000 und 6000 Hz. Außerdem sind alle Sonagramme kalibriert, d.h. eine bestimmte Eichfrequenz begrenzt es auf beiden Seiten. Die Abstände der Eichöne betragen 1000 Hz. Die Darstellung der Sonagramme basiert auf der Heisenberg'schen Unschärferelation, d.h. sie ist der Frequenz nach scharf, nach der Zeit aber unscharf abgebildet. Abb. 6 zeigt ein Sonagramm

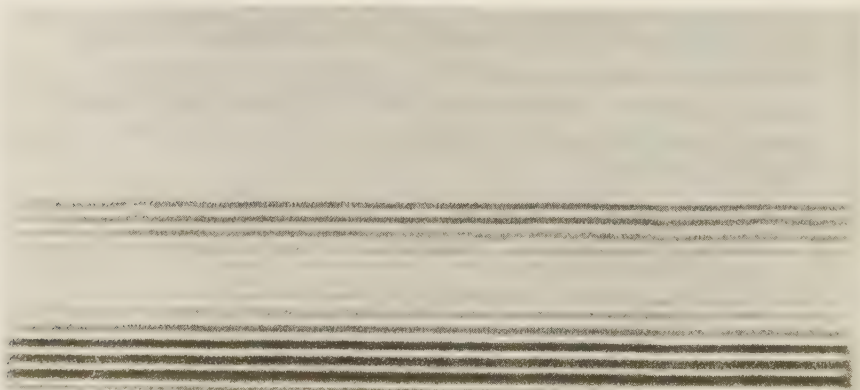


Abb.6 Sonagramm des Vokals A in der Tonhöhe a

3. Schwierigkeiten bei der Gewinnung der Sonagramme

Bereits die Stimmaufzeichnung war mit einem großen Zeitaufwand verbunden, denn eine annähernde Beibehaltung der Tonhöhe und Lautstärke (alle Aufnahmen erfolgten bei rund 75 Phon) erreichten die Probanden erst nach langem Üben. Dazu trat bei den späteren Aufnahmen ein Nebengeräusch auf, das ein Tonkopf verschuldete. Um dieses Geräusch auszuschalten, wurde die Stimme über ein Tonband aufgenommen. Da aber der technische Mehraufwand keinen deutlichen Erfolg zeigte, wurde die Aufnahmegeschwindigkeit von 1,2 sec auf 2,4 sec verlängert. Das Tonkopfgeräusch war zwar nicht mehr zu hören, dadurch aber die Aufnahmebedingungen erschwert. Eine dritte und zugleich größte Schwierigkeit lag in der Aufnahmetechnik. Da auf keinerlei Erfahrung hinsichtlich der Bedienung dieses Apparates zurückgegriffen werden konnte, vergingen Monate, bis die richtige Einstellung gefunden war, zumal der Sonagraph während dieser Zeit mehrmals zur Reparatur gegeben werden mußte.

4. Verwendete Apparaturen

a) Der Lautpegelmesser

Ein Lautpegelmesser diente zur Erzielung einer konstanten Lautstärke. Dieses Gerät besteht aus einem Mikrophon, einem Verstärker und einem Röhrenvoltmeter, dessen Anzeige in Phon geeicht ist. (Ausführung Rhode & Schwarz)

b) Der Sonagraph

Der Sonagraph ist ein Gerät, bei dem es mit Hilfe magnetischer Speicherung trotz sukzessiver Analyse der ver-

schiedenen Frequenzbereich gelingt, den Eindruck eines kontinuierlich - sumultanen Spektraldiagrammes zu erhalten, was auf folgende Weise geschieht:

Die zu analysierende Stimme wird auf dem Mantel einer rotierenden zylindrischen Magnetscheibe mit Hilfe eines Aufnahmekopfes gespeichert, der bei der Abtastung der magnetischen Tonspur auch als Wiedergabekopf verwendet wird. Ein Löschkopf verhindert bei der Aufnahme, daß mehr als ein Schallvorgang gespeichert wird. Bei der Aufnahmedauer kann zwischen 1,2 und 2,4 sec gewählt werden. Die erst genannte Zeit läßt eine Aufzeichnung von 160 - 16000 Hz, die zweite von 80 - 8000 Hz zu. Bei der Analyse wird die gespeicherte Aufnahme von einem eingebauten Suchtonanalysator von unten nach oben abgetastet, was mit einer Schneckenspindel geschieht. Dabei rotiert die Trommel mit einer gegenüber der Aufnahmezeit wesentlich erhöhten Geschwindigkeit. Die Aufzeichnung des Schallvorganges in Schwärzungsschrift, einem der Faksimileübertragung entlehntes Verfahren, erfolgt durch ein Bandfilter mit entweder 45 oder 300 Hz Bandbreite. Eine Schreibelektrode brennt je nach Spektralintensität die helle Auflage eines geschwärzten Papierees mehr oder weniger weg, so daß das Klangspektrogramm und seine zeitlichen Veränderungen als eine Hell - Dunkel - Schraffur abgebildet wird. Ein rotes Lämpchen zeigt das Ende der Aufzeichnung an.

II. Methodik

1. Versuchsanordnung und Durchführung

Die Versuchsanordnung bestand aus einem Lautpegelmesser und einem Sonagraphen wie Abb. 7 zeigt. Ein Harmonium diente dazu, die entsprechende Tonhöhe vorzugeben.

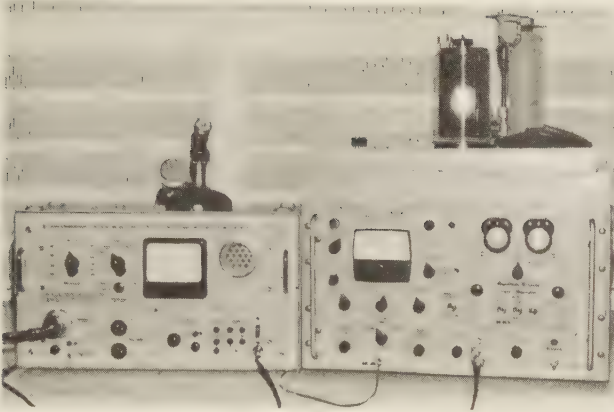


Abb. 7 Sonograph mit Lautpegelmesser

Der Gesang wurde über ein Mikrophon auf der Magnetscheibe des Sonographen mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1,2 Sekunden gespeichert. Dabei wurde darauf geachtet, daß die Lautstärke von 75 Phon so gut wie möglich beibehalten wurde. Nach der Überspielung des Tones brannte eine Elektrode den Eichton von 1000 Hz so in die Aufnahme ein, daß beide Enden des Sonagrammpapiers beschrieben wurden. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt.

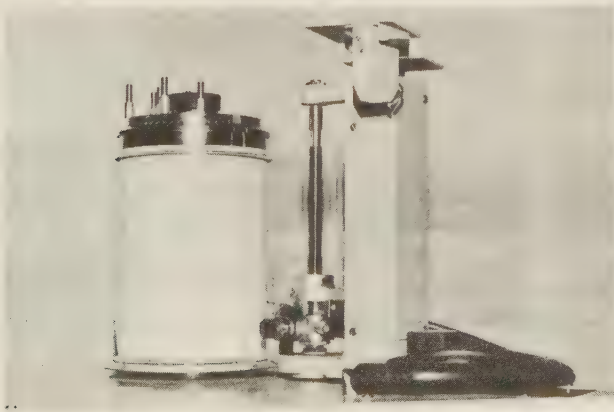


Abb.8 Aufnahmetrommel des Sonographen

Die anschließende Analyse vollzog sich mit einer Schreibelektrode, die während der Rotation der Trommel mit Hilfe einer Schneckenspindel von unten nach oben geschoben wurde. Dabei wurden die gewünschten Frequenzen von 160 - 5500 Hz aufgezeichnet, ohne daß die Aufnahmen übersteuert waren. Auf Grund technischer Schwierigkeiten mußte die Aufnahmezeit von 1,2 sec. auf 2,4 sec. verlängert werden.

2. Aufnahmetechniken

Folgende Aufnahmetechniken von WINCKEL (21) schlossen eine Reihe von Fehlerquellen aus:

a) Einhaltung der Sprechentfernung

Die Sprechentfernung muß ziemlich genau eingehalten werden, da bei Annäherung an das Mikrophon während des Sprechens die Amplituden des tiefen Frequenzbereiches ansteigen. Der Abstand zum Mikrophon von 0,50 m war daher während der Aufnahmen konstant.

b) Die Aufnahmedauer

Bei jedem Sprechensatz unterliegt die menschliche Stimme einem Einschwingvorgang, der einerseits die Tonhöhe, andererseits die Lautstärke regelt. Daher war die Aufnahmedauer ein wesentlicher Faktor, ein konstantes Frequenzspektrum zu erreichen, das laut Aufgabenstellung Voraussetzung für eine experimentelle Auswertung darstellte.

c) Messung der Lautstärke

Die Messung der Lautstärke ist von großer Wichtigkeit, da gewisse harmonische Töne erst ab einer bestimmten Lautstärke im Sonagramm auftreten. Um einen objektiven Stimmvergleich anstellen zu können, muß die Lautstärke und damit die Zahl der harmonischen Töne gleich sein.

d) Ausschaltung des Raumeinflusses

Da die Aufnahmen in einem reflexionsarmen Zimmer gemacht wurden, wurde der Einfluß des Raumes auf die Singstimme zu einem gewissen Grad eliminiert, d.h., die Sekundäranteile des Schalles, die sich durch Wand-reflexion ergaben, wurden zum größten Teil ausgeschaltet (4). Da der auftreffende Schall geschluckt wird, erfaßt das Mikrophon nur die primären Anteile der Schallquelle; hier also die Stimmgebung des Sängers allein.

Überraschender Weise stellte WINCKEL fest, daß die Spektren der im reflexionsarmen Raum aufgenommenen Aufnahmen eine höhere Teiltonenergie aufweisen, als jene, die in normal ausgekleideten Studios aufgenommen wurden.

e) Einhaltung der Tonhöhe

Da es die Aufgabe war, die Stimme bei Tonhöhenänderung zu analysieren, war die Einhaltung der Tonhöhe durch die Aufgabenstellung bedingt.

D. Eigene Untersuchungen mit Ergebnissen

=====

Die Untersuchungen bestanden in der Auswertung der Sonagramme. Anfangs wurden die einzelnen Abstände zwischen den harmonischen Tönen errechnet. Diese Ergebnisse zeigten zwar, daß die Abstände gleich groß waren, jedoch zum Teil erheblich von der Norm abwichen. Durch diese Tatsache veranlaßt, wurde die Methode geändert. Um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen, mußte der Frequenzbereich auf 3000 Hz beschränkt und diese Zahl durch die Anzahl der vorhandenen Töne dividiert werden. Dadurch verkleinerte sich die Abweichung auf ein Minimum mit Ausnahme der 3. Versuchsreihe (Tonhöhe d^1). Jetzt konnte jenen größeren Abweichungen eine stärkere Bedeutung zugemessen werden (siehe Kap. E.1.c.). Die nicht ausgefüllten Stellen in der Spalte "Zahl der harmonischen Töne" zeigen (siehe Anhang), daß nicht alle Partialtöne in diesen 3000 Hz vorhanden waren, und eine Beschränkung auf einen kleineren Frequenzbereich notwendig war. Da der Frequenzbereich für die Auswertungen noch ausreichte, hatte dies für die Genauigkeit der Auswertungen keine erheblichen Bedeutungen.

Meine Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Bei gleicher Tonhöhe ist der Abstand zwischen den harmonischen Tönen gleich groß. (Satz von FOURIER s.o.)

- a) bei allen Vokalen
- b) bei allen Versuchspersonen

Abbildung 9 zeigt den Vokal E. Von derselben Person stammt der Vokal U (Abb. 10). Zum Vergleich sei der Vokal A einer zweiten Person gegenüber gestellt (Abb. 11).

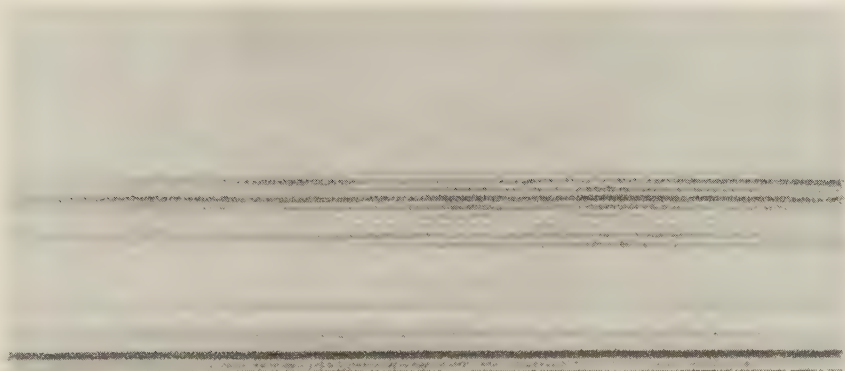


Abb. 9 Sonagramm des Vokals E, Tonhöhe d

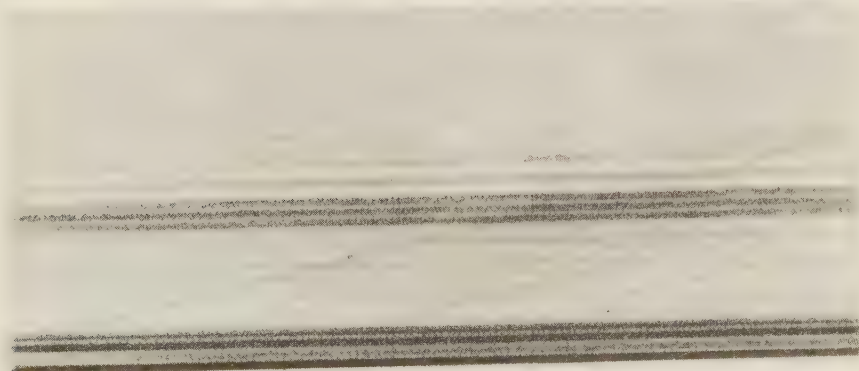


Abb. 10 Sonagramm des Vokals U, Tonhöhe d

Abb. 11 Sonagramm des Vokals A, Tonhöhe d

2. Die Lage der harmonischen Töne ist in Abhängigkeit von der Grundtonhöhe in der vertikalen Achse des Spektrums parallel verschoben. Diese Verschiebung im Frequenzbereich ist nur abhängig von der Tonhöhe, jedoch nicht vom Sprecher und von der Artikulation, also eine reine Funktion der Frequenz.

3. Der Abstand zwischen den harmonischen Tönen steigt mit der Tonhöhe, und zwar in einer proportionalen Abhängigkeit (Abb. 12). In meinen beiden ersten Versuchsreihen konnte ich den Satz von FOURIER auch experimentell mit dem Sonagrammen nachweisen, jedoch in meiner 3. Versuchsreihe zeigte sich eine größere Abweichung der bisher festgestellten Proportionalität. Zum Vergleich wird an dieser Stelle auf die Abb. 6 hingewiesen, die den Vokal A in der Tonhöhe a zeigt.



Abb. 12 Sonagramm des Vokals E, Tonhöhe d¹

4. Bei steigender Tonhöhe nimmt die Zahl der harmonischen Töne ab. Der umgekehrt proportionale Zusammenhang ist auch hier gegeben.
5. Eine Tonhöhenschwankung im Sinne eines Vibratos z.B. ruft bei den harmonischen Tönen im unteren Frequenzbereich um die horizontale Achse eine periodische Schwingung geringer Amplitude hervor, die mit steigender Frequenz grösser wird. Dieses Ergebnis stellt eine Einzelbeobachtung dar, die FOURIER bereits beschrieben hat.
6. a) Die Bandbreite eines harmonischen Tones ist abhängig von seiner Lage zum Formantbereich, d.h. der Frequenzdurchmesser nimmt zu, je näher der Partialton am Formantmaximum liegt. Diese Tatsache ist aus den abgebildeten Sonagrammen und aus den Tabellen am Ende dieser Arbeit klar ersichtlich.

- b) Mit zunehmender Grundtonhöhe wird die prozentuale Größenabweichung der einzelnen Frequenzbandbreiten in Bezug auf das Frequenzband mit maximalem Durchmesser stetig größer. Die Ursache darin ist in der verminderten Anzahl und daher in dem größeren Abstand der harmonischen Töne zueinander zu sehen. Daraus folgt, daß die Größe der Amplitude ein Maß für die Frequenzbandbreite ist und daß man aus ihr die Amplitudengröße errechnen kann.

7. a) Die Errechnung des Mittelwertes nach der Formel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{v=1}^n x_v \right)$$

Als Mittelwert für die gesungene Tonhöhe $d = 146,84$ Hz ergibt sich eine Frequenz von $147,4$ Hz, für die Tonhöhe $d^1 = 293,67$ Hz eine Größe von $287,83$ Hz. Beide Ergebnisse gelten für den Vokal A.

- b) Bestimmung der Standardabweichung nach der Formel:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^n (x_v - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Die Standardabweichung beträgt für die Tonhöhe d

$$s_1 = 1,67 \text{ Hz}$$

für die Tonhöhe d^1

$$s_2 = 3,09 \text{ Hz}$$

E. Diskussion
=====

1. Besprechung und Gegenüberstellung der eigenen Ergebnisse mit der Literatur

a) des Ergebnisses aus D 1

Bereits CHLADNI (2) erwähnt die Begriffe "Grundton und Harmonische" bei seinen Betrachtungen über Saitenschwingungen.

FOURIER (6) aber gab dem Klang die mathematische Form. Nach dessen Aussage stehen die Partialtöne im ganzzahligen Verhältnis zum Grundton. Bei meinen Sonagrammen kommt dies auch deutlich zum Vorschein. Nach diesen Erkenntnissen ist es egal, welche Person die Vokale singt und was für Vokale gesungen werden. Der Abstand untereinander ist immer der gleiche. Die Besonderheit aber, daß bei den Harmonischen verschiedene Amplituden auftreten, deutet auf den individuellen Klang hin.

b) des Ergebnisses aus D 2

Mit Grundtonhöhe ist nach FOURIER (6) die Lage der harmonischen Töne, vorausgesetzt, daß es sich um eine periodische Schwingung handelt, festgelegt. Wird die Spannung und somit die elastische Rückstellkraft der Stimmlippen durch die neurogene Steuerung geändert, so ändert sich die Grundfrequenz, die dem tiefsten Eigen-ton, dem sogenannten Grundton entspricht. Eine derartige Phasenverschiebung aber schließt eine Amplitudenänderung mit ein. Da jedoch FLETCHER (5) die stationäre Lage des Formantbereiches nachgewiesen hat, ist mit einer Amplitudenänderung eine Änderung des Klanges verbunden, wie Abb. 13 zeigt. Eine Verschiebung nach rechts ist ebenso vorstellbar.

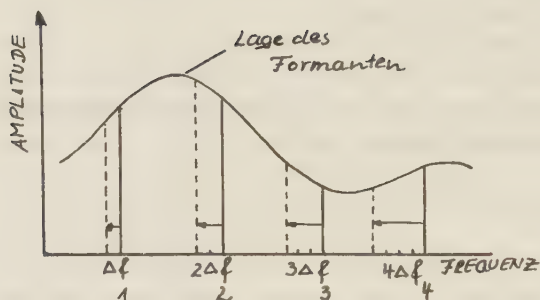


Abb. 13 Frequenzabhängigkeit der Amplitudengröße

- = Lage der harmonischen Teiltöne vor der Frequenzverschiebung
 ----- = Lage der harmonischen Teiltöne nach der Frequenzverschiebung

Da die Abhängigkeit des Abstandes zwischen den harmonischen Tönen und der Tonhöhe im unteren Frequenzbereich klar zum Ausdruck kommt, kann man den umgekehrten Weg gehen, nämlich vom Abstand der harmonischen Töne auf die Tonhöhe schließen. Diese Überlegung gestattet folgenden Rückschluß:

Jeder Sprecher, sei es ein Kind, ein Mann oder eine Frau, hat eine ihm eigene Sprechtonhöhe, die die Lage des Grundtones festlegt und somit genau bestimmen läßt. Die Frequenzlage des Grundtones erhält man durch folgende Berechnung:

$\frac{f}{n}$; f sei der Frequenzbereich, n die Anzahl der darin vorkommenden harmonischen Töne.

Die Genauigkeit bei der Grundtonbestimmung wird zudem erhöht, indem man einen möglichst großen Frequenzbereich wählt. Der dabei auftretende Fehler wird auf $\frac{1}{n}$ reduziert.

c) des Ergebnisses aus D 3 und D 4

Die Diskussion dieser Ergebnisse kann man zusammenfassen, da die Dehnung der harmonischen Töne eine Abnahme der Ordnungszahl mit einschließt. WINCKEL (20) hat dieses Phänomen erstmals beschrieben. Er stellte jedoch bei ganz hohen Tönen einen Wiederanstieg der Teiltöne fest, was er mit dem erhöhten Betriebsdruck zu erklären versucht. Die Ergebnisse von LUCHSINGER (10) der den Atemvolumenverbrauch von Sängern auf verschiedenen Tonhöhen untersuchte, könnte dafür eine Erklärung geben.

Das Ergebnis aus D 3 beschreibt den proportionalen Zusammenhang von Tonhöhe und Abstand der harmonischen Teiltöne und zeigt eine größere Abweichung bei der 3. Versuchsreihe. Der Grund dieser Abweichung kann liegen:

In dem oben erwähnten erhöhten Betriebsdruck. Da die Probanden keine ausgebildete Stimme hatten, war es schwierig, den für sie hohen Ton über längere Zeit zu halten.

In der Tonhöhenempfindung, wie sie ZWICKER und FELDTKELLER (22) angeben, d.h. daß ein vorgegebener Ton als nicht so hoch empfunden und daher mit einer niedrigeren Frequenz wiedergegeben wird.

In beiden Fällen - wobei sie sich untereinander nicht ausschließen - ist mit einem geringeren Frequenzabstand zwischen den Partialtönen zu rechnen.

d) des Ergebnisses aus D 5

G.KITTEL hat die Folgeerscheinung einer Tonhöhenschwankung im Sinne eines Vibratos bereits in einer Vortragsreihe erwähnt. ZWICKER und FELDTKELLER (22) schreiben: Da die Frequenz f_1 zwischen $f_1 - \Delta f$ und $f_1 + \Delta f$ schwankt, ist die Größe $2\Delta f$ die Größe der Reizstufe. Mit anderen Worten ausgedrückt, die Größe der Frequenzschwankung ist abhängig von der Frequenzhöhe. Somit ist auch hier eine Übereinstimmung mit der Literatur gegeben.

e) des Ergebnisses aus D 6

Die Schwärzung der harmonischen Töne war ein relatives Maß für die Größe der Amplitude und nicht für die Auswertung geeignet. Nach den obigen Ergebnissen aber läßt sich an Hand des selben Sonagrammes aus den Breiten der einzelnen Frequenzbänder die Formantlage berechnen. Die Berechnung wird um so genauer, je tiefer der Grundton liegt, da nach den Ergebnissen nach FOURIER die Zahl der im Formanten vorkommenden Teiltöne größer wird.

f) des Ergebnisses aus D 7

Die Abweichung des Mittelwertes von der vorgegebenen Tonhöhe beträgt bei der Tonhöhe $d=0,56$ Hz, bei der Tonhöhe $d^1=5,84$ Hz.

Diese Ergebnisse zeigen, wie erstaunlich genau ungeübte Sänger, wie es meine Probanden waren, die Tonhöhe einhalten können, wenn auch sie vorher eine geraume Zeit für die Aufnahme üben mußten.

2. Kritik an der eigenen Methode

a) Fehlerquelle bei der Aufnahme selbst

Da ich kein absolutes Gehör besitze, kann ich den gesungenen Ton in der Höhe nicht genau beurteilen. Es können also geringe Frequenzdifferenzen aufgetreten sein, die ich als solche nicht erkannt habe.

b) Fehlerquelle bei der Ausmessung

Die Eichung der Sonagramme erfolgte, wie bereits erwähnt in einem Abstand von 1000 Hz. Eine Abweichung bei der Ausmessung um 0,1 mm z.B. bedeutet eine Fre-

quenzdifferenz von ungefähr 5 Hz. Diese Frequenzdifferenz hätte sich mit einer noch mehr gedehnten Aufzeichnung verringern lassen, jedoch wäre dies auf Kosten der höheren Frequenzanteile möglich gewesen. Um aber das Frequenzspektrum bis knapp 6000 Hz beurteilen zu können, schloß ich einen Kompromiß und nahm diese Ungenauigkeit in Kauf.

Eine weitere Fehlerquelle entstand dadurch, daß die Dehnung nicht linear erfolgte, sondern der 1000 Hz - Abstand von 20 mm im 1000 Hz - Bereich sich auf 16,2 mm im 5000 Hz - Bereich verkleinerte. Ich nahm den Frequenzbereich zwischen dem 1000 Hz - Abstand jeweils als linear an, da mir die nicht lineare Dehnung unbekannt war. Dennoch zeigte sich bei den Ergebnissen eine Abweichung vom Mittelwert nur um höchstens 4,67 Hz, was noch im Bereich der Messungsgenauigkeit liegt. Diese Zahlenangabe bezieht sich nur auf die beiden ersten Versuchsreihen. Die Ergebnisse der dritten Versuchsreihe unterliegen noch weiteren Parametern (Siehe Kap. E.1.c).

Da bei den Auswertungen keine größere Differenz vorkam, erübrigte sich die Rechnung für die Signifikanz.

3. Aussichten für weitere Untersuchungen

Diese und ähnliche Untersuchungen dienen dazu, das Geheimnis der Stimme weiter zu erforschen. Der bisherige Einsatz modernster Geräte macht sich immer mehr bezahlt. Gerade in jüngster Zeit hat der Sonagraph sehr an Bedeutung gewonnen, denn durch seinen Einsatz zur Feststellung der Identität von Menschen, namentlich in der Kriminologie zur Überführung von Kidnappern und anderen Verbrechern, ist ein Millionenverbrechen aufgeklärt worden. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet ergibt sich bei den Gesangsstudien, der Korrektur von Sprachfehlern, Fremdsprachenstudien, sowie bei der Ver-

wendung als Hilfsmittel für Taube zur Verbesserung ihrer Ausdrucksmöglichkeiten (12). Natürlich stehen die Wissenschaftler noch am Anfang einer neuen Ära, und der erwartete Erfolg wird sich erst in den kommenden Jahren abzeichnen.

F. Zusammenfassung

=====

Untersucht wurden die Harmonischen der Vokale A,E,I,O,U bei Tonhöhenänderung in drei verschiedenen Tonlagen. Zu den Stimmaufzeichnungen standen 20 Probanden zur Verfügung, von denen jeweils 15 Aufnahmen gemacht wurden. Als Aufzeichnungsgerät diente ein Sonagraph. Eine Reihe von Aufnahmetechniken ließen die Fehlerquellen möglichst klein erscheinen. Es waren dies die Einhaltung der Sprechentfernung, der Lautstärke, der Tonhöhe und die Berücksichtigung der Einschwingzeit der Stimme.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Bei gleicher Tonhöhe ist der Abstand zwischen den harmonischen Tönen gleich groß. Dieses Ergebnis ist unabhängig von:

a) der Art der Vokale

b) allen Versuchspersonen

Daraus folgt, daß die menschliche Stimme den von FOURIER aufgestellten Gesetzen der Klanganalyse ebenso unterliegt wie z.B. ein Musikinstrument.

2. Die Lage der harmonischen Töne ist in Abhängigkeit von der Grundtonhöhe in der vertikalen Achse des Spektrums parallel verschoben, d.h., die Grundtonfrequenz bestimmt den Abstand zwischen den harmonischen Tönen und somit deren Lagebezeichnung zueinander.

3. Der Abstand zwischen den harmonischen Tönen steigt mit zunehmender Tonhöhe.

4. Bei steigender Tonhöhe nimmt die Zahl der harmonischen Teiltöne ab. Diese Tatsache ist die unmittelbare Folge des vorausgehenden Ergebnisses.

5. Eine Tonhöhenschwankung im Sinne eines Vibratos äußert sich in einer quasi periodischen Änderung der Frequenz. Der auftretende "Frequenzhub" ist proportional der Teiltonhöhe.

6. Die Bandbreite eines harmonischen Tones ist abhängig von seiner Lage zum Formantbereich, d.h., der Frequenzbanddurchmesser wird bei Annäherung eines Partialtones an das Formantmaximum größer. Bei zunehmender Grundtonhöhe wird die prozentuale Differenz der Bandbreite noch markanter, da der Abstand zwischen den harmonischen Tönen größer wird.

7. Als Mittelwert für die gesungene Tonhöhe $d = 146,84$ Hz ergibt sich eine Frequenz von $147,4$ Hz, für die Tonhöhe $d^1 = 293,67$ Hz eine Größe von $287,83$ Hz.

Die Standardabweichung für die Tonhöhe d beträgt

$s_1 = 1,67$ Hz
für die Tonhöhe d^1

$s_2 = 3,09$ Hz

Die Ergebnisse 1 mit 5 waren bereits bekannt und konnten erstmals mit dem Sonographen bestätigt werden. Die Ergebnisse 6 und 7 einer derartigen Untersuchung wurden in keiner Literatur erwähnt.

G. Literaturverzeichnis

=====

1. BERG, J. van den: Sur les théories myoélastiques et neurochronaxiques.
Rev. laryng. 5/6 (1954)
2. CHLADNI, E.F.F.: Entdeckung über die Theorie des Klanges. Leipzig (1787) 2.
3. CREMER, L.: Vorlesungen über technische Akustik. Springer, Berlin-Heidelberg-New York (1971)
4. DRAPER, M.H., P. LADEFOGED, D. WITTERIDGE: Respiratory muscles in speech.
J. Speech Res. 2 (1959) 16-27
5. FLETCHER, H.: Speech und Hearing.
New York (1927) 8
6. FOURIER, J. B.: Mém. Acad. France 4, Paris (1824) 185
7. HABERMANN, G.: Neuere Untersuchungsmethoden des Kehlkopfes und der Stimme und ihre praktische Anwendung in Laryngologie und Phoniatrie.
Dtsch. med. J. 13 Frankfurt (1962) 288 - 293
8. HUSSON, R.: La voix chantée. Paris, Gauthier-Villars (1960)
9. JOOS, M.: Acoustic Phonetics, Language 24, Nr. 2, Suppl. (1948)
10. LUCHSINGER, R.: Schalldruck- und Geschwindigkeitsregistrierung der Atemluft beim Singen. Folia phoniatic. 3 (1951) 25
11. LUCHSINGER, R., G.E. ARNOLD: Lehrbuch der Stimm- und Sprachheilkunde. 3. Aufl. Springer, Wien-New York (1970)

12. MEYER - EPPLER, W.: Experimentelle Untersuchungen zum Mechanismus von Stimme und Gehör in der lautsprachlichen Kommunikation.
In: Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, hsg. von L. Brandt, Westdeutscher Verlag Köln - Opladen (1955)
13. POTTER, R. K., G.A. KOPP, H.C. GREEN: Visible Speech. Van Nostrand Verlag New York (1947)
14. RUDOLPH, G.: Rôle des influx proprioceptifs. Rev. Laryng. Mai (1956)
15. TARNOCZY, T.v.: Akust. Z. 8 (1943) 22
16. TRAUTWEIN, F.: Elektrische Analogie der Sprachwerkzeuge und Musikinstrumente. Allgem. Stimmkongress Paris (1937)
17. TRENDLENBURG, F.: Einführung in die Akustik. Springer, Berlin-Göttingen-Heidelberg 3. Aufl. (1961)
18. Ders.: Z. techn. Phys. 10 (1929) 528
19. WEISS, D.: Discussions of the neurochronaxic theory. Arch. otolaryngol. 70 (1959) 607 - 618
20. WINCKEL, F.: Elektroakustische Untersuchungen an der menschl. Stimme. Folia phoniatic. 4 Fasc. 2 (1952) 93 - 113
21. Ders.: Elektroakustische Meßtechnik
In: Lehrbuch der Stimm- und Sprachheilkunde, hsg. von R. Luchsinger, G.E. Arnold, 3. Aufl. Springer, Wien-New York (1970) 90 - 113
22. ZWICKER, E., R. FELDTKELLER: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel, Stuttgart 78 ff.

Tabellen:

Die mit (x) bezeichneten Spalten beziehen sich auf den Frequenzbereich bis 3000 Hz. Δf bedeutet die Frequenzdifferenz zum vorgegebenen Grundton.

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen in Hz (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
1	A	d	146	-0,84	20,0
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	289	-4,67	10,1
	E	d	149	+2,16	19,7
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	289	-4,67	10,1
	I	d	146	-0,84	20,0
		a	218	-2,0	13,4
		d ¹	286	-7,67	10,2
	O	d	146	-0,84	20,0
		a	219	-1,0	13,3
		d ¹	284	-9,67	10,3
	U	d	148	+1,16	19,7
		a	220	$\pm 0,0$	13,3
		d ¹	284	-9,67	10,3
2	A	d	149	+2,16	19,7
		a	224	+4,0	13,0
		d ¹	290	-3,67	10,0
	E	d	146	-0,84	20,0
		a	219	-1,0	13,3
		d ¹	289	-4,67	10,1
	I	d	147	+0,16	19,8
		a	218	-2,0	13,4
		d ¹	288	-5,67	10,1
	O	d	146	-0,84	-
		a	218	-2,0	-
		d ¹	289	-4,67	-
	U	d	147	+0,16	-
		a	218	-2,0	-
		d ¹	286	-7,67	-

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen in Hz (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
3	A	d	147	+0,16	19,8
		a	221	+1,0	13,2
		d ¹	287	-6,67	10,2
	E	d	149	+2,16	19,7
		a	217	-3,0	13,5
		d ¹	287	-6,67	10,2
	I	d	146	-0,84	20,0
		a	217	-3,0	13,5
		d ¹	286	-7,67	10,2
	O	d	148	+1,16	-
		a	218	-2,0	-
		d ¹	287	-6,67	-
	U	d	149	+2,16	19,7
		a	220	± 0	-
		d ¹	286	-7,67	-
4	A	d	145	-1,84	-
		a	219	-1,0	13,3
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	146	-0,84	20,0
		a	222	+2,0	13,1
		d ¹	289	-4,67	10,1
	I	d	146	-0,84	20,0
		a	218	-2,0	-
		d ¹	290	-3,67	10,1
	O	d	148	+1,16	-
		a	219	-1,0	13,3
		d ¹	288	-5,67	10,1
	U	d	148	+1,16	-
		a	220	± 0 ,	-
		d ¹	287	-6,67	-
5	A	d	146	-0,84	20,0
		a	217	-3,00	13,5
		d ¹	284	-9,67	10,3

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen in Hz (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
6	E	d	143	-3,84	21,0
		a	217	-3,00	13,5
		d ¹	283	-10,67	10,4
	I	d	143	-3,84	21,0
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	282	-11,67	10,5
	O	d	145	-1,84	-
		a	216	-4,00	-
		d ¹	284	-9,67	-
	U	d	144	-2,84	-
		a	217	-3,00	-
		d ¹	284	-9,67	-
	A	d	147	+0,16	19,8
		a	219	-1,00	13,3
		d ¹	290	-3,67	10,0
	E	d	142	-4,84	20,1
		a	217	-3,00	13,5
		d ¹	286	-7,67	10,2
	I	d	146	-0,84	-
		a	219	-1,00	13,3
		d ¹	289	-4,67	10,1
	O	d	142	-4,84	20,1
		a	220	± 0	-
		d ¹	282	-11,67	10,5
	U	d	145	-1,84	-
		a	221	+1,00	-
		d ¹	284	-9,67	-
7	A	d	150	+3,16	19,4
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	283	-10,67	10,4
	E	d	150	+3,16	19,4
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	283	-10,67	10,4

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen in Hz (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
8	I	d	148	+1,16	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	283	-10,67	10,4
	O	d	147	+0,16	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	285	-8,67	-
	U	d	149	+2,16	-
		a	223	+3,00	-
		d ¹	285	-8,67	-
	A	d	145	-1,84	-
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	292	-1,67	10,0
	E	d	147	+0,16	19,8
		a	222	+2,00	-
		d ¹	292	-1,67	10,0
	I	d	148	+1,16	-
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	292	-1,67	10,0
	O	d	144	-2,84	-
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	290	-3,67	-
	U	d	149	+2,16	-
		a	221	+1,00	-
		d ¹	290	-3,67	-
9	A	d	150	+3,16	19,4
		a	219	-1,00	13,3
		d ¹	283	-10,67	10,4
	E	d	147	+0,16	19,8
		a	217	-3,00	13,4
		d ¹	283	-10,67	10,4
	I	d	148	+1,16	-
		a	217	-3,00	13,4
		d ¹	285	-8,67	-
	O	d	146	-0,84	-
		a	218	-2,00	-
		d ¹	284	-9,67	-

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen in Hz (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
10	U	d	147	+0,16	-
		a	218	-2,00	-
		d ¹	286	-7,67	-
	A	d	146	-0,84	20,0
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	146	-0,84	20,0
		a	216	-4,00	-
		d ¹	284	-9,67	10,3
	I	d	147	+0,16	-
		a	217	-3,00	-
		d ¹	283	-10,67	-
	O	d	145	-1,84	-
		a	218	-2,00	-
		d ¹	283	-10,67	10,4
11	U	d	146	-0,84	-
		a	218	-2,00	-
		d ¹	284	-9,67	-
	A	d	150	+3,16	19,4
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	292	-1,67	10,0
	E	d	151	+4,16	19,3
		a	219	-1,00	13,3
		d ¹	289	-4,67	10,1
	I	d	151	+4,16	-
		a	219	-1,00	-
		d ¹	290	-3,67	-
	O	d	150	+3,16	19,4
		a	218	-2,00	-
		d ¹	287	-6,67	10,2
	U	d	149	+2,16	-
		a	220	+0	-
		d ¹	290	-3,67	-

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
12	A	d	147	+0,16	19,8
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	145	-1,84	20,2
		a	220	± 0	-
		d ¹	283	-10,67	10,4
	I	d	146	-0,84	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	286	-7,67	10,2
	O	d	148	+1,16	-
		a	219	-1,00	-
		d ¹	283	-10,67	-
	U	d	149	+2,16	-
		a	221	+1,00	-
		d ¹	285	-0,67	-
13	A	d	150	+3,16	19,5
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	292	-1,67	10,0
	E	d	147	+0,16	19,8
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	292	-1,67	10,0
	I	d	150	+3,16	19,5
		a	219	-1,00	13,2
		d ¹	292	-1,67	-
	O	d	151	+4,16	19,4
		a	222	+2,00	-
		d ¹	287	-6,67	-
	U	d	151	+4,16	19,3
		a	220	± 0	-
		d ¹	288	-5,67	-
14	A	d	146	-0,84	20,0
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	144	-2,84	20,2
		a	224	+4,00	13,0
		d ¹	286	-7,67	10,2

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
15	I	d	145	-1,84	20,1
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	284	-9,67	10,3
	O	d	145	-1,84	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	284	-9,67	10,3
	U	d	144	-2,84	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	284	-9,67	10,3
	A	d	147	+0,16	19,8
		a	218	-2,00	13,4
		d ¹	292	-1,67	10,0
	E	d	147	+0,16	19,8
		a	218	-2,00	13,4
		d ¹	292	-1,67	10,0
	I	d	149	+2,16	19,6
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	286	-7,67	10,2
	O	d	148	+1,16	-
		a	216	-4,00	13,5
		d ¹	289	-4,67	10,1
	U	d	146	-0,84	-
		a	219	-1,00	-
		d ¹	290	-3,67	-
16	A	d	150	+3,16	19,4
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	291	-2,67	10,1
	E	d	150	+3,16	19,4
		a	222	+2,00	13,1
		d ¹	291	-2,67	10,1
	I	d	149	+2,16	-
		a	220	± 0	13,3
		d ¹	295	+1,33	9,9
	O	d	149	+2,16	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	293	-0,67	-

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
17	U	d	149	+2,16	-
		a	221	+1,00	-
		d ¹	294	+0,33	-
	A	d	149	+2,16	-
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	295	+1,33	9,9
	E	d	150	+3,16	19,5
		a	218	-2,00	13,4
		d ¹	295	+1,33	9,9
	I	d	148	+1,16	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	295	+1,33	9,9
	O	d	149	+2,16	-
		a	219	-1,00	-
		d ¹	295	+1,33	9,9
18	U	d	148	+1,16	-
		a	221	+1,00	13,2
		d ¹	295	+1,33	-
	A	d	149	+2,16	19,6
		a	218	-2,00	13,4
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	149	+2,16	19,6
		a	223	-4,67	10,1
		d ¹	289	+3,00	13,1
	I	d	148	+1,16	-
		a	222	+2,00	13,1
		d ¹	289	-4,67	-
	O	d	149	+2,16	-
		a	221	+1,00	-
		d ¹	289	-4,67	-
	U	d	147	+0,16	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	291	-2,67	-

Proband	Vokal	Tonhöhe	Abstand zwischen den harmonischen Tönen (x)	Δf	Zahl der harmonischen Töne (x)
19	A	d	147	+0,16	19,9
		a	218	-2,00	13,4
		d ¹	286	-7,67	10,2
	E	d	149	+2,16	19,6
		a	220	± 0	13,3
		d ¹	286	-7,67	10,2
	I	d	149	+2,16	-
		a	218	-2,00	13,2
		d ¹	284	-9,67	10,3
	O	d	147	+0,16	19,8
		a	219	-1,00	-
		d ¹	286	-7,67	10,2
	U	d	148	+1,16	-
		a	217	-3,00	-
		d ¹	288	-5,67	-
20	A	d	148	+1,16	19,7
		a	220	± 0	13,3
		d ¹	289	-4,67	10,1
	E	d	150	+3,16	19,5
		a	217	-3,00	13,6
		d ¹	286	-7,67	10,2
	I	d	149	+2,16	-
		a	219	-1,00	-
		d ¹	294	+0,33	9,9
	O	d	148	+1,16	-
		a	220	± 0	-
		d ¹	292	-1,67	10,0
	U	d	144	-2,84	-
		a	222	+2,00	-
		d ¹	289	-4,67	10,1

Tabelle für das 6. Ergebnis (Vokal A)

f 1', f 2', bedeutet das erste bzw. das zweite Frequenzband über dem Partialton größter Amplitude, entsprechend f 1 und f 2 die darunter liegenden. Die Spalten unter 1., 2. und 3. Formanten geben die Frequenzbandverkleinerung in % an.

Proband	harm. Töne	Tonhöhe d Formant(in%)			Tonhöhe d ¹ Formant(in%)		
		1.	2.	3.	1.	2.	3.
1	f 2'	4,5	13,5	10	25	35	25
	f 1'	9,1	9,1	+0	10	25	10
	f 1	4,5	4,5	-5	+0	10	25
	f 2	-	9,1	5	-	10	35
2	f 2'	9,6	4,8	9,5	37	34	31
	f 1'	4,8	9,5	4,8	10	27	+0
	f 1	4,8	9,5	4,8	34	10	25
	f 2	-	10,1	9,5	-	34	29
3	f 2'	4,6	5,0	10,0	33	17	27
	f 1'	9,2	+0	5,0	5	24	42
	f 1	4,6	5,0	5,0	17	5	42
	f 2	-	+0	10,0	-	12	25
4	f 2'	13,5	10,0	5,0	9	48	20
	f 1'	9,1	5,0	+0	27	18	10
	f 1	9,1	5,0	5,0	+0	27	20
	f 2	-	+0	10,0	-	27	40
5	f 2'	+0	2,3	4,8	29	47	10
	f 1'	4,6	4,6	3,1	12	31	20
	f 1	+0	4,6	4,8	41	10	+0
	f 2	-	9,2	9,6	-	47	10
6	f 2'	9,1	12,4	10,0	16	44	20
	f 1'	4,5	10,0	5,0	+0	39	10
	f 1	9,1	5,0	7,5	28	+0	10
	f 2	4,5	5,0	10,0	-	28	10
7	f 2'	4,5	13,5	10,0	44	50	10
	f 1'	9,1	9,1	5,0	11	15	30
	f 1	4,5	4,5	+0	6	10	30
	f 2	-	9,1	5,0	-	15	40
8	f 2'	4,8	9,6	5,0	47	26	+0
	f 1'	+0	4,8	5,0	37	17	20
	f 1	4,8	+0	5,0	41	31	40
	f 2	-	4,8	10,0	-	9	30
9	f 2'	4,5	7,0	10,0	10	43	17
	f 1'	4,5	3,5	5,0	10	43	9
	f 1	4,5	2,8	+0	40	+0	25
	f 2	-	2,8	5,0	-	11	33

Prqband	harm. Töne	Tonhöhe d Formant(in%)			Tonhöhe d ¹ Formant(in%)		
		1.	2.	3.	1.	2.	3.
10	f 2'	4,8	10,1	6,7	+0	34	10
	f 1'	+0	6,0	4,1	31	29	20
	f 1	-	4,8	5,2	+0	29	10
	f 2	-	9,6	8,7	-	29	20
11	f 2'	4,6	11,4	9,6	39	45	-
	f 1'	9,2	4,8	9,6	5	42	30
	f 1	4,6	4,8	4,8	5	5	10
	f 2	-	9,6	9,6	-	11	30
12	f 2'	9,6	10,0	10,0	28	37	27
	f 1'	4,8	5,0	5,0	+0	37	18
	f 1	4,8	5,0	7,5	14	12	18
	f 2	-	+0	10,0	-	25	9
13	f 2'	9,6	9,6	9,0	45	31	18
	f 1'	9,6	4,8	7,2	9	31	9
	f 1	4,8	+0	3,6	9	31	9
	f 2	-	4,8	7,2	-	25	18
14	f 2'	9,6	9,6	10,0	8	44	40
	f 1'	4,8	4,8	5,0	40	39	10
	f 1	4,8	+0	+0	8	33	40
	f 2	-	4,8	5,0	-	39	10
15	f 2'	9,6	9,6	9,6	+0	41	27
	f 1'	4,8	9,6	4,8	16	35	18
	f 1	9,6	4,8	4,8	16	29	8
	f 2	9,6	4,8	9,6	-	41	27
16	f 2'	9,1	9,1	10,0	+0	39	9
	f 1'	4,5	10,4	7,5	50	33	27
	f 1	9,1	9,1	5,0	33	33	18
	f 2	-	4,5	10,0	-	11	+0
17	f 2'	4,6	5,0	10,0	6	29	20
	f 1'	9,2	-	5,0	12	18	16
	f 1	4,6	+0	5,0	12	18	16
	f 2	-	-	5,0	-	12	16
18	f 2'	4,8	9,6	10,0	45	50	33
	f 1'	+0	9,0	9,6	+0	45	22
	f 1	4,8	4,8	5,0	10	-	11
	f 2	-	9,6	5,0	-	10	22
19	f 2'	9,6	9,6	7,5	20	41	39
	f 1'	4,8	+0	2,5	13	29	33
	f 1	4,8	9,6	5,0	20	12	44
	f 2	-	4,8	5,0	-	29	44
20	f 2'	9,6	9,6	5,0	50	17	10
	f 1'	4,8	6,7	5,0	40	17	20
	f 1	-	4,8	5,0	25	25	10
	f 2	-	9,6	10,0	-	31	10

LEBENS LAUF

Name: Karl Weidl
Geboren am: 25. März 1946
In: Aidenbach/Niederbayern
Name der Eltern: Karl Weidl, Kaufmann
und Frau Katharina Weidl, geb. Bayer
Staatsangehörigkeit: deutsch
Schulbildung: 1952 - 1957 Volksschule in Aidenbach
1957 - 1964 Math.-nat. Gymnasium Vilshofen
1964 - 1967 Math.-nat. Gymnasium Pfarrkirchen
Studiengang: Studium der Zahnmedizin vom Winterhalbjahr
1967/68 an der Universität Erlangen -
Nürnberg bis zum Sommerhalbjahr 1972
Prüfungen: Abitur am 21. Juli 1967
Zahnärztliche Vorprüfung 1. Teil
am 1. August 1968
Zahnärztliche Vorprüfung 2. Teil
am 3. März 1970
Zahnärztliche Prüfung am 11. September 1972

Offsetdruck-Fotodruck

J. Hogl, 8520 Erlangen Hauptstr. 109, (Nähe Martin-Luther-Platz) Tel. 22990